

소수주형 철도교의 궤도시스템 변화에 따른 동적거동 분석

A Dynamic Behavior Analysis of composite Few Plate Girder Railway Bridge under Variety of Track systems

이홍준*
Lee, Hong-Joon

최정열**
Choi, Jung-Youl

엄맥***
Eom, Mac

박용걸****
Park, Yong-Gul

ABSTRACT

The latest technical development of steel plate girder railway bridge are developing in ways to maximize its durability of materials in use of high strength steel and efficiency of maintenance and management by the introduction of simplified and standardization ideas. In addition to this, it is also expected to reduce the cost of bridge construction and to simplify the process of bridge manufacturing. Referring to this, composite few plate girder railway bridge is highly recommendable that is very economical with the fine exterior.

In this paper, it will analyse the variation of dynamic behavior of existing composite few plate girder railway bridge with ballast caused by modified Slab Track through interpretation of limited enzyme in order to obtain the existing data for improvement of Slab Track system from Ballast Track system. Consequently, it can help maximize economic efficiency and structural capability. As a results, although the natural frequency by modified Slab Track are decreased, it is hardly influencing on the safety of railway bridges. It is also evident in the case of slab deck with a reduced scale in comparison with Ballast Track. Therefore, it is expected to reduce the cost of a railway bridge plan. And, it can expect the synergistic effect of the ensure long term durability of bridge caused by decreased stresses of bottom flange due to reduced dead load. As a result, the analytical study are carried out to investigate the composite few plate girder railway bridge could be the optimal design method for the dynamic safety of a girder section.

1. 서론

최근 활발히 진행되고 있는 강철도교량의 기술개발은 내구성 향상, 교량 건설비용 절감, 유지관리의 효율성 등을 극대화 할 수 있는 방향으로 발전하고 있으며 고강도재의 사용으로 내구성과 강재효율을 극대화하고 단순화, 표준화 개념을 도입하여 제작의 단순화 및 유지관리의 효율성을 추구한다. 소수주형 철도교량은 이에 적합한 경제적이며 미관이 우수한 교량이라 할 수 있겠다.

이에 본 논문에서는 기존 자갈도상 소수주형 철도교의 Slab Track화에 따른 동적 거동 변화를 유한요소 해석을 통하여 분석함으로써 기존의 Ballast Track system을 Slab Track system으로 개선하는 기초데이터를 확보하고자 하며, 이에 따라 기존 소수주형교에 대해 경제성, 유지보수성, 구조적 성능을 극대화 하고자 한다.

또한, 궤도시스템 변화에 따른 단면변화, 장대화를 통한 소수주형 철도교량의 최적설계 방안을 향후과제로써 제시하였다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 학생회원

** (주)대한콘설탄트 철도부 궤도팀 사원, 정회원

*** 서울산업대학교 구조공학과 학부과정, 비회원

**** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

2. 궤도시스템별 특성 고찰

2.1 Ballast Track system

Ballast Track은 기본적으로 도상 위에 지지되는 침목과 레일로 조립한 궤광으로 구성된다. 도상은 노반에 대한 천이층을 형성하는 보조 도상 위에 놓이고, 레일과 침목은 체결 장치로 결합하며, 이들의 부재 및 포인트와 크로싱과 같은 기타의 구조는 모두 궤도의 일부로서 고려한다.

Ballast Track의 장점으로서는 입증된 기술, 상대적으로 낮은 건설비, 궤도부재의 단순한 교체, 상대적으로 단순한 궤도선형 정정(보수), 미세 선형 조정 가능성, 양호한 배수성, 탄성 및 소음 감소 등을 들 수 있다.

이에 반해 열차하중에 기인하는 도상의 점진적인 열화, 곡선에서 불평형 횡가속도의 제한, 도상의 오염, 마모 및 노반에서 상승하는 미립자에 기인하는 투수성 감소, 상대적으로 무겁고 높은 궤도 구조, 레일 체결 장치에서의 탄성의 증가 등의 단점을 가지고 있다.

구조 형식의 선택은 예상되는 축중과 속도 뿐만 아니라 요구되는 서비스 수명, 보수 작업의 유형과 양, 사용조건 및 기본 재료의 조달 가능성에서도 좌우된다. 이것은 궤도시스템의 선택이 각각 개별적인 조건에 따라 정해지는 기술적, 경제적 문제임을 의미하며, 특히 중요한 것은 궤도의 건설비와 갱신비용간의 관계에 더하여 일상의 보수비이며, 최종의 목표는 보수 작업 및 갱신에 대한 총비용의 최소화이다.

현대의 철도 운영에 있어서 점점 더 현저해져 가는 자갈 궤도의 확실한 단점 때문에 슬래브 궤도가 대단히 경쟁적인 대안으로 전개되고 있는 실정이다.

2.1 Non-Ballast(Slab) Track system

기존선 궤도시스템의 대부분은 Ballast Track system이지만, 최근에는 점차 자갈이 없는 궤도를 적용하고 있는 추세이다. Slab Track system의 주요 장점은 보수주기가 길고, 유용성이 높으며, 궤도구조의 높이가 낮고 중량이 상대적으로 가벼운 점 등이다. 더욱이, 최근의 LCC 연구에 의하면 슬래브 궤도는 유지보수 비용 측면에서 대단히 경쟁적인 궤도구조 시스템인 것으로 나타났다.

선로의 설계에서는 생애주기비용, 건설기간, 유용성 및 내구성과 같은 요인이 점점 더 중요한 역할을 하게 된다. 도상 자갈이 없는 궤도의 개념은 이 점에서 좋은 기회를 제공한다.

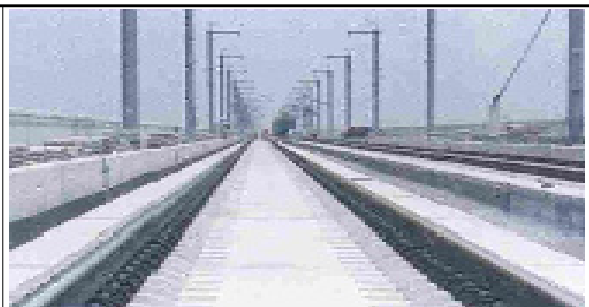
또한, 교통강도가 성장할수록 보수와 갱신 작업 수행은 점점 더 어려워진다. 유럽의 선로망에서는 야간 점유(차단) 시간이 5시간 이상 지속되지 않는 경우가 많다. 이와 같은 배경에서 보수가 적은 궤도의 설계가 증가하는 경향이 있다.

지금까지 새로운 프로젝트는 주로 투자비에 기초하여 평가하였음에 반하여 오늘날에는 생애주기비용 계산의 원리를 강하게 적용하고 있다. 이러한 경향의 결과로서 Ballast Track system의 개념은 Slab Track system에 비하여 매력을 잃어갈 것이다.

이에 본 논문에서는 기존의 Ballast Track으로 이루어진 소수주형 철도교의 궤도시스템을 Slab Track화 함으로써 이 때의 동적거동에 대하여 분석하고, 새로운 궤도시스템 적용의 적합성을 해석적으로 검증하고자 한다.



Ballast Track system



Slab Track system

3. 유한요소해석

본 연구의 해석대상 교량은 LS-22 표준하중으로 설계된 지간장 50m의 단순지지 소수주형교로써 기존의 궤도시스템은 Ballast Track으로 목침목을 사용하는 전형적인 비방진 궤도이다. 이에 궤도의 방진화 및 생력화를 피하고자 다음과 같이 해석적 기법을 통해 그 적합성을 검증해 보고자 한다.

해석을 위한 유한요소해석 모델은 아래의 그림 2와 같이 3차원 Shell요소를 이용하였으며, 주형, 가로보, 수직보강재, 다이아프램은 4절점 Shell요소를 사용하고 레일과 침목, 브레이싱은 Frame요소를 사용하여 모델링 하였다. 레일과 침목, 침목과 상부 Deck 및 플랜지 각각의 절점을 연결시켜 역학적으로 합성된 거동을 하도록 하였다. 또한, Ballast Track 모델링에는 자갈도상의 영향을 반영하기 위해 현재 경부선의 일반적인 궤도 스프링계수($K_s=200\text{kgf/cm}^2$)를 고려하여 침목과 Deck Plate간의 각각의 절점을 연결시킴으로써 자갈도상의 중량 및 강성이 고려되어 교량과 합성된 궤도로써의 거동을 하도록 모델링 하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 레일은 KS60을 사용하였으며 침목은 교량용 목침목 23cm×23cm를 10m당 17개로 배치하였다. 표 1은 해석모델에 적용한 물성치를 나타낸 것이며 또한 해석 시 고려한 사하중 항목은 표 2와 같다.

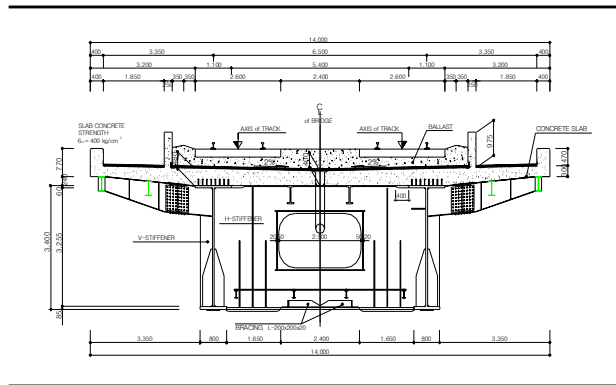


그림 1. 해석대상 구조물의 횡단면도

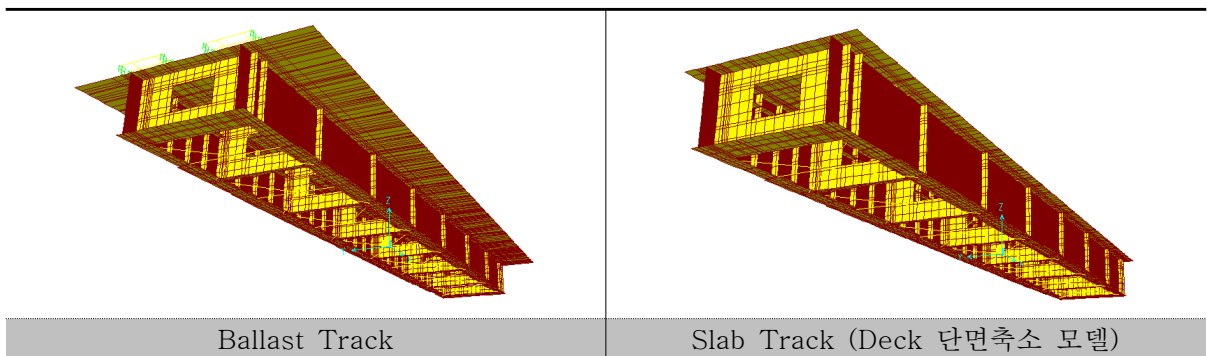


그림 2. 구조해석 모델링 - Ballast Track 및 Slab Track(slab depth : 20cm/25cm)

표 1. 해석모델 적용 물성치

분류	Member, Rail(steel)	Deck	Slab Track	Sleeper
탄성계수(kgf/cm ²)	2.1×10^6	3.0×10^5	3.0×10^5	1.68×10^5
단위중량(tonf/m ³)	7.85	2.5	2.5	0.8
포와송비	0.3	0.2	0.2	0.345

표 2. 사하중 항목

구 분	Deck	Ballast	Sleeper	Rail	비 고
Ballast Track	○	○	○	60kgf/m	
Slab Track	○	-	-	60kgf/m	

4. 해석결과

4.1 궤도시스템 변화에 따른 고유진동수 및 사하중 고려시 정적변위 분석 결과

본 논문에서는 궤도시스템 변화에 따른 교량의 동적거동 분석과 Slab Track화에 있어서 도상 두께 변화에 따른 고유진동수 분석을 실시하였으며, 이 결과를 토대로 적정 도상두께에서의 Slab Deck 폭 축소로 인한 중량감소가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다.

Ballast Track의 고유진동수 분석 결과 1차모드에서 13.689Hz로 나타났으며, Slab Track화에 따른 고유진동수는 슬래브 두께 25cm에서 14.345Hz, 슬래브 두께 20cm에서는 12.467Hz로 나타나 Slab Track 적용 시 안정적인 동적 거동을 감안할 때 적정 슬래브 두께는 20cm가 적합할 것으로 판단된다. 이 결과를 토대로 교량 자체 사하중의 영향을 감소시키기 위해 Slab Deck 폭을 기존 14m에서 9m로 축소 시켰을 경우의 고유진동수를 분석해 본 결과 1차모드에서 12.617Hz로 나타나 전체 중량 감소에 따른 고유진동수가 Ballast Track과 비교 시 거의 동일한 거동을 보임으로써 교량의 동적거동에 대한 안정성을 확보하였다. 이는 전체적인 사하중은 감소되었으나 Slab Track의 고강성 특성에 의해 전체 교량의 강성은 증가한 것으로 판단된다.

사하중만을 고려한 정적변위 비교에서는 Slab Track화 후, Ballast Track 상태에서의 발생 최대처짐(3.123mm)과 약 29%(2.208mm) 차이를 보임으로써 사하중에 따른 정적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며 네 가지 경우 모두 허용 처짐기준($\delta_a = L/1,100 = 50/1,100 = 0.046m$)에 부합하는 것으로 나타났다. 이상의 검토를 통해 Slab Track화에 따라 교량의 전체적인 자중을 줄이고 강성은 높임으로써 정·동적 거동에 대한 구조적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

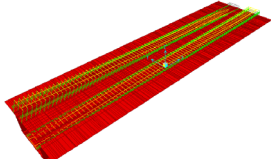
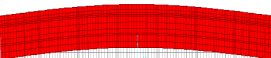
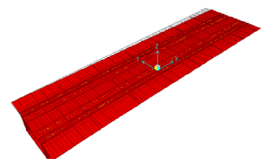
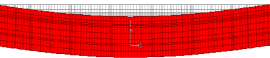
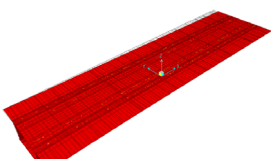
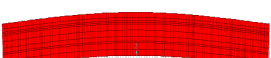
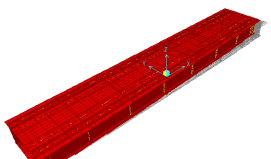
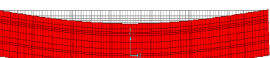
			
MODE 1 : 0.459sec	MODE 2 : 0.208sec	MODE 1 : 0.504sec	MODE 2 : 0.260sec
Ballast Track의 모드별 고유주기		Slab Track(20cm)의 모드별 고유주기	
			
MODE 1 : 0.438sec	MODE 2 : 0.192sec	MODE 1 : 0.498sec	MODE 2 : 0.256sec
Slab Track(25cm)의 모드별 고유주기		Slab Track(20cm : Deck 폭 축소)의 모드별 고유주기	

그림 3. 궤도시스템별 고유주기 비교

표 3. 궤도시스템 변화에 따른 고유주기 및 고유진동수 변화비교

구 분	Mode1		Mode2		Mode3		Mode4	
	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)
Ballast Track	0.459	13.689	0.208	30.208	0.083	75.701	0.076	82.673
Slab Track(20cm)	0.504	12.467	0.260	24.166	0.091	69.046	0.090	69.813
Slab Track(25cm)	0.438	14.345	0.192	32.725	0.068	92.399	0.064	98.175
Slab Track (20cm : Deck 폭 축소)	0.498	12.617	0.256	24.544	0.093	67.561	0.081	77.570
Frequency Ratio (%) : Ballast Track의 경우와 비교								
Slab Track(20cm)	-	8.9	-	20.1	-	8.8	-	15.6
Slab Track(25cm)	-	(+)4.8	-	(+)8.3	-	(+)22.1	-	(+)18.7
Slab Track (20cm : Deck 폭 축소)	-	7.8	-	18.7	-	10.8	-	6.2

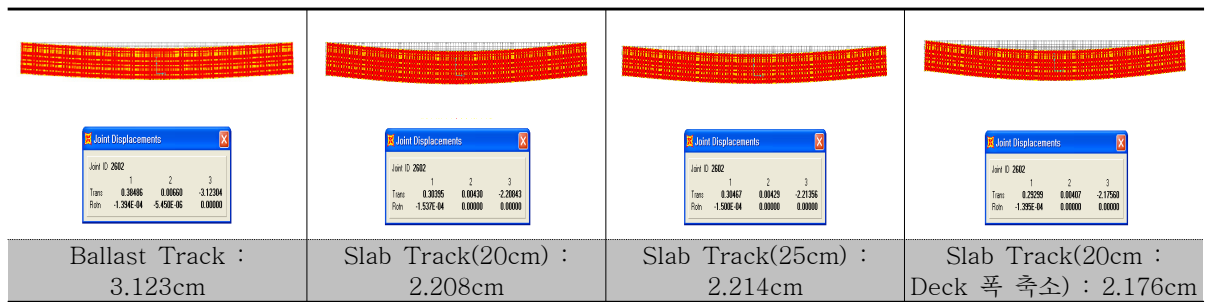
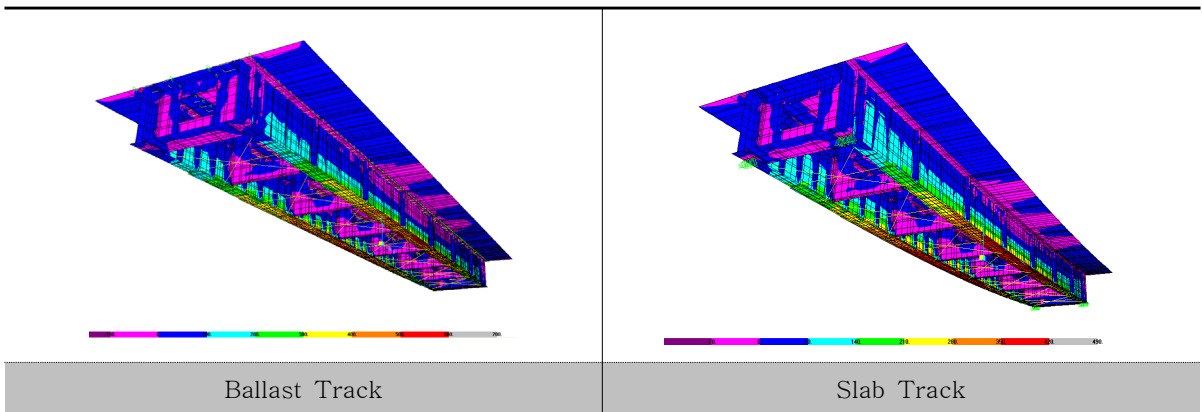


그림 4. 궤도시스템 변화에 따른 정적 변위분석(사하중 고려)

4.2 궤도시스템 변화에 따른 주형의 응력검토결과

본 논문에서는 궤도시스템 변화에 따른 소수주형 철도교의 응력을 분석하기 위해 사하중에 대한 응력검토 및 Slab Track화에 따른 사하중 감소에 의한 응력감소분을 산출하였다.

Slab Track화 및 이에 따른 Deck 폭 축소를 통한 사하중 감소에 의해 주형이 부담하는 응력감소분이 약 177kgf/cm² 정도로 분석되어 공용기간 중 Slab Track화에 의한 발생 응력 감소로 주형의 손상을 줄이고 이에 따른 장기적인 내구성 확보 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.



구 분		Stress (kgf/cm ²)	Stress Range (kgf/cm ²)
Ballast Track	MAX	558	947
	MIN	-389	
Slab Track (20cm)	MAX	397	643
	MIN	-246	
Slab Track (25cm)	MAX	399	644
	MIN	-245	
Slab Track (20cm : Deck 폭 감소)	MAX	381	632
	MIN	-251	

그림 5. 궤도시스템 변화에 따른 주형의 응력검토(사하중 고려)

4. 결 론

소수주형 철도교의 궤도시스템 변화에 따른 동적특성 및 Slab Track의 적용 가능성을 검토하고자 해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 궤도시스템 변화에 따른 교량의 고유진동수 변화를 분석한 결과, Slab Track화에 의해 고유진동수가 다소 감소되는 것으로 나타났으며 이는 교량의 전체적인 진동에 대한 안전성 확보에 긍정적인 효과를 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 슬래브 Deck 폭 축소에 따른 고유진동수 분석 결과에서도 Ballast Track과 비교 시 거의 동일한 거동을 보임으로써 교량의 정·동적거동에 대한 안정성을 확보하여 교량 설계 시 비용면에서의 경제적 효과를 보일 수 있을 것으로 판단된다.

2) Slab Track화에 따른 사하중 감소에 의해 주형 하부플랜지 응력감소(177kgf/cm²)로 인하여 장·단기적으로 구조물의 내구성 확보 및 피로성능향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 주형의 안전성을 고려한 교량의 최적 설계 방안으로 제시될 수 있음을 해석적으로 증명하였다.

3) Slab Track화에 따른 교량의 동적거동 안정성 확보는 교량 전체의 단면변화와 장대화를 가능케 할 것으로 기대하며 이를 소수주형 철도교량의 최적설계를 위한 향후과제로 제시하고자 한다.

5. 참고문헌

1. 포항산업과학연구원, “고속철도 합성형교량 설계요령” 1998
2. 대한토목학회 “철도설계기준(철도교편)”, 1999
3. 오지택, 박문수, 최진유 “판형교의 고유진동수 특성에 관한 연구” 한국철도학회 2002
4. 최규홍 “소수거더 철도교량에서의 수평브레이싱의 역할”, 국민대학교 석사학위 논문집 2003
5. 철도청 “철도설계편람 제5편 강철도교량(안)”, 2003
6. 조준희, 배두병 “2주형 강합성형 철도교량의 동적거동에 대한 변수 연구”, 대한토목학회 2004
7. 조준희, 최규홍, 배두병 “소수거더 철도교량의 동적해석에 따른 연구”, 한국강구조학회 2004
8. 최정열, “강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구” 한국철도학회논문집 2004
9. 김연호, 오지택, 송재필, 김기봉 “유한요소프로그램을 이용한 철도판형교의 동적거동”, 한국철도학회논문집 2005